

# 表面完整性研究用预测模型的研究进展<sup>\*</sup>

李文辉<sup>1,2</sup>, 高建红<sup>1,2</sup>, 高 焱<sup>1,2</sup>, 杨胜强<sup>1,2</sup>, 李秀红<sup>1,2</sup>, 武锋锋<sup>1,2</sup>

(1. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024;

2. 精密加工山西省重点实验室, 太原 030024)

**[摘要]** 综述了国内外表面完整性研究时采用的预测模型的种类、应用等研究现状。详细阐述了使用分析模型和数值模型对材料切除过程中零件表面的显微结构、残余应力等表面完整性参数的预测, 并指出了影响预测模型准确性的一些因素。

**关键词:** 表面完整性; 分析模型; 数值模型; 残余应力; 显微结构

## Research Progress of Predictive Models for Surface Integrity

LI Wenhui<sup>1,2</sup>, GAO Jianhong<sup>1,2</sup>, GAO Wei<sup>1,2</sup>, YANG Shengqiang<sup>1,2</sup>, LI Xiuhong<sup>1,2</sup>, WU Fengfeng<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Precision Machining, Taiyuan 030024, China)

**[ABSTRACT]** The types and applications of predictive models for surface integrity are reviewed comprehensively. Analytical model and numerical model used to predict surface integrity parameters on workpiece surface in material removal processes are introduced in detail, including microstructure and residual stress. Some factors influencing the accuracy of the prediction model are pointed out.

**Keywords:** Surface integrity; Analytical model; Numerical model; Residual stress; Microstructure

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2016.20.105

表面完整性是描述、鉴定和控制零件加工过程在其加工表面层内可能产生的各种变化及其对该表面工作性能影响的技术指标<sup>[1]</sup>。一般而言, 表面完整性可以包含两方面内容: 一是与表面形貌或表面纹理组织有关的部分, 研究零件最外层表面与周围环境界面的几何形状, 属于外部加工效应, 包括表面微观几何形状与表面缺陷等表面特征; 二是与加工表面层物理力学性能状态有关的部分, 研究表面层内的特性, 属于内部加工效应, 包括表面层的残余应力、变形强化、加工硬化、金相组织变化、裂纹等技术指标<sup>[2]</sup>。表面完整性对零部件的功能特性、可靠性、耐久性 etc 有很大的影响。

表面完整性包含很多指标, 但是目前预测模型主要关注残余应力和显微结构。被加工工件表面层的残余应力对零部件的疲劳性、耐磨性、腐蚀性和结构完整性有直接影响, 因此它是被加工工件重要的完整性属性。确定切削条件、刀具的几何形状等和其他加工参数对加工表面形成的残余应力的影响是研究的主要动因。机器零件的显微结构对零件的性能(例如疲劳性、腐蚀性

和耐磨性)有重要的影响, 零件表面的显微结构会随材料加工发生显著变化, 这可能会损害或改善零件的使用性能。预测模型的重点在于产生理想的显微结构, 从而获得最理想的产品寿命和性能。近年来, 表面完整性研究采用的预测模型逐渐成为研究的焦点。当前表面完整性研究用的预测模型主要有两种, 即分析模型和数值模型。

## 1 分析模型

分析建模是基于物理加工的理论方法, 具有物理原则特点, 能够使人们从根本上理解加工机理。与数值计算方法相比, 可以大量减少计算时间。但是分析建模过程中有很多未知的条件, 这些未知条件多数情况下作假设处理。当进行大量假设时, 分析模型就会偏离实际的加工过程。如果这些假设不成立, 建模则会更加困难。由于这种方法是基于物理建模, 而不是试验模型, 因而可以比其他方法更准确地反映实际的物理现象。因此, 除了假设的问题外, 这种方法是研究者使用的最贴近实际问题的解决方法。

### 1.1 对残余应力的预测

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金项目(51345010, U1510118); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20131402110002)。

Barash 等<sup>[3]</sup>使用一个简单的滑移线场模型预测了工件亚表面的残余应力。随后, Liu 等<sup>[4]</sup>使用侧面磨损的刀具模拟了加工后亚表面的机械性能。Wu 等<sup>[5]</sup>使用分析模型研究了工件硬度对残余应力模型的影响。Outeiro 等<sup>[6]</sup>在分析模型中采用切削流动预测模型分析了热量分布,表明了刀具边缘半径对残余应力的影响。Ulutan 等<sup>[7]</sup>创建了分析加工过程中残余应力的模型,在热平衡方程中使用有限差分技术确定刀具、切屑和工件的温度场,其中工件的温度场用于残余应力的热-机械模型中,受力和机械载荷产生的应力通过分析弹塑性模型和松弛程序进行计算。Liang 等<sup>[8]</sup>提出一种用于正交切削的残余应力预测模型。该模型使用工艺条件作为输入,分析加工过程中表面和亚表面的残余应力。在此基础上, Liang 等<sup>[9]</sup>提出一种物理模型,根据先前规定的残余应力定量地描述加工条件和刀具几何参数。Lazoglu 等<sup>[10]</sup>通过叠加热应力和机械应力,提出一种增强的弹塑性分析模型,紧接着在模型中使用了松弛程序。然而,由于复杂的加工变量和几何属性,这些预测模型并没有很好地建立残余应力和零件疲劳寿命之间的关系。

Ulutan 等<sup>[11]</sup>建立了一种弹塑性模型,分析预测材料加工后表面的残余应力,并用 AISI 52100 钢的试验结果验证。该模型是基于有限元分析,使用切削力、切屑温度网格、刀具和工件作为一个整体一次计算,包括体积力、拉伸曳引力、静压力对热应力的影响,法向压力和切向曳引力对机械应力的影响对工件网格的每个节点结合这些影响因素进行考虑:

$$\begin{aligned} \sigma_{XX}^{el} &= \sigma_{XX}^{mech} + \sigma_{XX}^{therm} \\ \sigma_{ZZ}^{el} &= \sigma_{ZZ}^{mech} + \sigma_{ZZ}^{therm} \\ \sigma_{XZ}^{el} &= \sigma_{XZ}^{mech} + \sigma_{XZ}^{therm} \\ \sigma_{YY}^{el} &= \nu(\sigma_{XX}^{el} + \sigma_{ZZ}^{el}) - \alpha ET \\ \sigma_{ij}^{mech} &= f(z, x, f_r, f_t) \\ \sigma_{ij}^{mech} &= f(z, x, \alpha, T, E, \nu, G) \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $z$  为研究位置的深度;  $x$  为所研究位置和刀具-工件接触点在切削速度方向之间的距离;  $f_r$  为径向切削力;  $f_t$  为切向切削力;  $\alpha$  为工件的热膨胀系数;  $T$  为温度;  $E$  为工件的杨氏模量;  $\nu$  为泊松比;  $G$  为平面应变格林函数值的数组。

应用塑性变形理论,使用一个松弛程序模拟残余应力迭代,并将结果与之前的试验比较,发现二者比较吻合。与表面残余拉应力相比,对峰值残余压应力、拉应力到压应力的过渡点的预测更准确。

### 1.2 对显微结构的预测

Chou 等<sup>[12]</sup>提出了一种热模型,该模型是在假定精

确知道穿透深度的情况下,把临界温度穿透深度和无因次白层深度联系起来,对白层深度进行预测,并用硬车削 AISI 52100 钢验证了该模型的试验结果。然而,这种模式有许多假设,使其远离了实际情况,白层深度预测的准确性也受到影响。模型中假设后刀面磨损恒定,白层厚度仅是切削速度  $V$  的函数。Chou 等<sup>[13]</sup>以少量的假设发展了这种热模型,式(2)为一种包含剪切面与前刀面热源的热模型,研究表明前刀面的温度随着切削速度和进给率增大而升高,随切削深度增大而降低。由于温度对产品的白层形成和残余应力等表面完整性参数有很大影响,因此预测或测量温度,并了解其如何受工艺参数变化的影响至关重要。

$$T = f(T_0, Q, k, l_s, l_r, \varphi, \alpha, V, \chi, h_0) \quad (2)$$

式中,  $T_0$  为室温;  $Q$  为热通量;  $k$  为在工件的热传导率;  $l_s$  为剪切面长度;  $l_r$  为刀具与切片接触长度;  $\varphi$  为剪切角;  $\alpha$  为前角;  $V$  为切削速度;  $\chi$  为热扩散率;  $h_0$  为切削厚度。

Zhang 等<sup>[14]</sup>使用 IN-718 创建了应变率分析模型,包括应力( $\sigma$ )、温度( $T$ )、活化能( $Q$ ),以及材料参数  $A$ 、气体常数  $R$  和另一个常数  $\alpha$ ,用来表示加工过程中应变的产生,为预测白层做准备:

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) [\sin h \alpha \sigma]^{1/m} \quad (3)$$

Österle 等<sup>[15]</sup>模拟了研磨镍基高温合金 IN-738LC 时的热效应和机械效应,研究白层的形成、力学性能和热反应对白层形成所起的作用。研究发现,机械载荷及与这些载荷相关联的塑性变形不是白层形成的唯一原因,热过程(包括材料的局部熔化和快速淬火)也有显著的影响。

### 1.3 对其他因素的预测

近年来对金属加工中的尺寸效应进行了广泛研究,包括圆形切削刃对尺寸效应的影响,它们与严重塑性变形层的表面完整性有很大关系。通过有效整合最新提出的通用滑移线模型<sup>[16]</sup>和奥克斯利预测加工理论, Fang 等<sup>[17-18]</sup>提出了使用限制接触槽刀具加工的分析预测模型。这个扩展的滑移线模型用带有圆角切削刃的刀具加工,并结合了奥克斯利预测加工理论,能够对加工时的应变、应变率和温度影响进行考虑。随着预测和试验结果的逐渐吻合,对圆形切削刃切削区域的应力、应变、应变率和温度的预测为研究严重塑性变形层和模拟该层的机械性能提供了可能。此外, Chen 等<sup>[19]</sup>提出了一种新的几何模型,预测金刚石和金刚石碳涂层刀具棱边半径对精车铝合金 A356 时尺寸效应和加工性能的影响。

## 2 数值模型

数值模型能够利用复杂的材料模型,结合应变、应

变率和温度捕获流动应力变化特性,不需试验就能提供良好的预测,且具备开发专门用户子程序的能力。有限元仿真能够预测残余应力和白层,通过改变加工参数,进行重复分析,可确定加工工艺对参数变化的敏感性。

随着更好的材料结构模型、弹塑性-粘塑性模型及有限元法的使用和发展,计算机软件已经能够用于获取大量变量的解决方案,从而可更为详细地了解切屑的形成过程。基于有限元法的仿真技术根据介质力学原理能够对表面切屑形成过程进行详细分析,能够精确呈现加工过程的物理变化。

在 2D 环境中使用这些仿真软件进行分析,能够预测应变、温度、应力以及释放后的残余应力和白层厚度。这些预测通常使用弹性、塑性、弹塑性或弹性-粘塑性模型来模拟最佳加工条件,并在模型中使用二维正交切削结果、工件和刀具材料的特性。为了预测残余应力、显微硬度和加工工件表面的白层组织以及切削区域可能的磨损和破坏的实际场,应该相当精确地得到诸如应变、应力和温度等的三维切屑形成的场变量的空间计算。随着计算机和数值计算方法的进步,三维有限元仿真模型取得重大发展。这些模型是建立在切屑形成基础上,使用材料分离的损坏判断准则或工件网格重划分自动技术。因此,目前大多数研究仍然集中在三维分析上。

有限元模拟模型的主要难题是创建脱离工件表面的切屑,现在主要依赖人工切削分离法。具有网格重划分功能的有限元拉格朗日公式能够模拟连续和分段切削形成过程中刀尖周围材料的塑性流动,避免了使用人工材料分离准则,发展这些技术能够简化切屑形成的机理。此外创建了其他的模型,使用拉格朗日欧拉方程构建二维平面内应变正交切削及三维斜切和车削切屑形成模型,从而使有限元模型在实际加工中更实用。

## 2.1 对残余应力的预测

Ee<sup>[20]</sup> 结合试验和数值分析研究了正交切削 AISI 1045 钢时残余应力的产生,提出了一种针对残余应力的预测模型。使用有限元仿真模型研究限定圆角半径的刀具加工生成的残余应力,关键技术包括修正的 Johnson-Cook 材料模型、重划分网格法(不是切屑分离准则)模拟材料流动、卸载路径,考虑热-机械耦合对变形的影响。为了将 Johnson-Cook 模型用于低应变率的情况,修正了应变率硬化项,此模型中还包括了连续切削和切削速度的影响。

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\varepsilon}^{vp}) [1 + C \ln(\bar{\dot{\varepsilon}}^{vp} + 10^{-3} e^{-100(\bar{\varepsilon}^{vp})})] (1 - T^{*m}), \quad (4)$$

式中,  $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\varepsilon}^{vp}$  和  $\bar{\dot{\varepsilon}}^{vp}$  分别为有效压力、有效的粘塑性应变和有效的粘塑性应变率;  $T^*$  为温度;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$  分别为由试验数据确定的常量。

Umbrello 等<sup>[21]</sup> 提出了一种数字模型,使用基于硬

度的材料流动应力模型和切屑分离静压力断裂准则模拟硬车削 AISI 52100 钢。通过在商业化有限元软件 DEFORM-2DTM 中使用定制的用户程序实现该模型,研究硬车削时切削条件和切削刃的几何形状对工件亚表面残余应力分布的影响。Chen 等<sup>[22]</sup> 应用 ABAQUS 有限元软件,使用 Johnson-Cook 模型和分段切屑形成损伤模型预测了加工 Ti-64 合金时的残余应力分布,还研究了切屑形成的预测对残余应力预测的影响,发现使用分段切屑形成损伤模型能够提高对残余应力的预测。

## 2.2 对显微结构的预测

Ramesh 等<sup>[23]</sup> 提出了白层形成的有限元仿真模型,模拟诸如弯曲之类的问题。通过在 ABAQUS 有限元软件中开发出大量的 VUMAT FORTRAN 子程序,考虑了应力、应变对温度变化、体积膨胀、塑性变形的影响,该研究是在热主导切削条件下进行的,有利于促进相变化。Umbrello<sup>[24]</sup> 根据先进的实证模型,提出了一种有限元模型,用以预测显微结构变化,用机械加工中得到的试验数据来修正根据淬火、回火和材料流动法则得到的经验方程的各种系数。此外,开发了一种以弹粘塑性有限元法为基础的程序,模拟正交切削 AISI 52100 硬化钢过程中形成的白层和暗层。研究表明,只有在模拟中考虑了微观结构的相变(淬火和回火导致)时,才能接受预测精度<sup>[25]</sup>。

## 2.3 对其他因素的预测

早期对在微切削过程中由于材料不均匀性引起的表面缺陷进行了模拟。Simoneau 等<sup>[26-27]</sup> 利用有限元软件 ABAQUS 开发出一种模拟正交切削 AISI 1045 钢的模型。该模型中刀具锋利,工件由珠光体和铁素体两种不同的材料组成,这两种材料代表显微结构项,两种材料都由 Johnson-Cook 公式来模拟它们的特性。该模型还预测到加工表面有凹陷,用扫描电子显微镜观察加工表面,证实了凹陷的存在。

Caruso 等<sup>[28]</sup> 扩展了 Umbrello<sup>[24]</sup> 的工作,在正交硬加工 AISI52100 钢时,使用 Zener-Holloman 参数(公式(5))模拟了晶粒尺寸的变化,把晶粒尺寸变化与应变率和温度联系起来(公式(6))。

$$z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right), \quad (5)$$

式中,  $z$  为 Zener-Holloman 参数;  $\dot{\varepsilon}$  为应变率;  $Q$  为动态再结晶的活化能;  $R$  为通用气体常数。

经过动态再结晶后,再结晶晶粒的大小为:

$$d = d_0 \alpha (z^{-0.24352}) \quad (6)$$

式中,  $d$  为再结晶后晶粒尺寸;  $d_0$  为原始晶粒尺寸,  $\alpha$  为材料常数( $d_0 \alpha = 74559$ )。

### 3 结论

虽然分析模型具有物理原则特点,但因其难以得到正确的解析形式,预测金属切削加工性能时与数值模型相比使用较少。一般使用分析模型研究残余应力、硬度、表面粗糙度、塑性变形和加工硬化层的深度。

数值模型与金属切削加工形成的表面完整性分析模型并行发展,随着计算机性能的提高,最近几十年取得了很大进展。当前使用的有限元软件中包含了很多参数和影响结果有效性的假设,比如:不合理的简化、理想化假设、建模时边界条件不当等。虽然流动应力数据对结果的影响很大,但它不是唯一的影响因素。当前多数的有限元仿真模型使用的切屑分离机理不当,刀具-切屑和刀具-工件接触面间的热、机械现象模拟不当,这些都会对残余应力的可预测性产生很大的影响。

### 参考文献

[1] DAVIM J P. Surface integrity in machining[M]. Berlin: Springer, 2009.

[2] 洪泉,王贵成.精密加工表面完整性的研究及其进展[J].现代制造工程,2004(8):12-15.

HONG Quan, WANG Guicheng. Research and development of surface integrity in precision machining[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2004(8):12-15.

[3] BARASH M M, SCHOECH W J. A semi-analytical model of the residual stress zone in orthogonal machining[C]// Proceeding. of the 11th MTDR Conference. London: Pergamon Press,1970.

[4] LIU C R, BARASH M M. The mechanical state of the sublayer of a surface generated by chip-removal process Part 2: Cutting with a tool with flank wear[J]. Journal of Engineering for Industry Transactions of the ASME, 1976, 98(4):1202-1208.

[5] WU D W, MATSUMOTO Y. The effect of hardness on residual stresses in orthogonal machining of AISI 4340 steel[J]. Journal of Engineering for Industry Transactions of the ASME, 1990, 112(3):245-252.

[6] OUTEIRO J C, EE K C, DILLON JR O W, et al. Some observations on comparing the modeled and measured residual stresses on the machined surface induced by orthogonal cutting of AISI 316L steel [C]// Proc. of the 9th CIRP Int. Workshop on MMO, Bled, Slovenia, 2006:17-19.

[7] ULUTAN D, ÖZEL T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A Review [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 51(3):250-280.

[8] LIANG S Y, SU J C. Residual stress modeling in orthogonal machining[J]. CIRP Annals, 2007, 56(1): 65-68.

[9] LIANG S Y, HANNA C R, CHAO R M. Achieving machining residual stresses through model-driven planning of process parameters[J]. Transactions of the NAMRI/SME, 2008, 36:445-452.

[10] LAZOGLU I, ULUTAN D, ALACA B E, et al. An enhanced analytical model for residual stress prediction in machining[J]. CIRP Annals, 2008, 57(1):81-84.

[11] ULUTAN D, ALACA B E, LAZOGLU I. Analytical modeling of residual stresses in machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 183:77-87.

[12] CHOU Y K, EVANS C J. White layers and thermal modeling of hard turned surfaces[J]. International Journal of Machine Tools and

Manufacture, 1999, 39:1863-1881.

[13] CHOU Y K, SONG H. Thermal modeling for hard turning using a new tool[C]. ASME International Mechanical Engineering Congress, Washington(DC), 2003.

[14] ZHANG B, MYNORS D J, MUGARRA A, et al. Representing the super-plasticity of Inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004(153-154): 694-698.

[15] ÖSTERLE W, LI P X. Mechanical and thermal response of a nickel-base super alloy upon grinding with high removal rates[J]. Materials Science and Engineering, 1997(238): 357-366.

[16] FANG N, JAWAHIR I S, OXLEY P L B. A universal slip-line model with nonunique solutions for machining with curled chip formation and a restricted contact tool[J]. Journal of Mechanical Science, 2001, 43(2):557-580.

[17] FANG N, JAWAHIR I S. A new methodology for determining the stress state of the plastic region in machining with restricted contact tools[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(8):1747-1770.

[18] FANG N, JAWAHIR I S. An analytical predictive model and experimental validation for machining with grooved tools incorporating the effects of strains strain-rates and temperatures[J]. CIRP Annals, 2002, 51(1):83-86.

[19] CHEN S, JAWAHIR I S. The influence of cutting edge radius on surface integrity and size effects in dry turning of automotive aluminum alloy A356 with diamond tools[C]// Proc. of the 11th CIRP Conf. on MMO. Gaithersburg, 2008:247-254.

[20] EE K C. Finite element modelling and analysis of residual stresses in 2-D machining[D]. Lexington: University of Kentucky, 2002.

[21] UMBRELLO D, HUA J, SHIVPURI R. Hardness-based flow stress and fracture models for numerical simulation of hard machining AISI 52100 bearing steel[J]. Materials Science and Engineering, 2004(374): 90-100.

[22] CHEN L, EL-WARDANY T I, HARRIS W C. Modeling the effects of flank wear and and chip formation on residual stresses[J]. CIRP Annals, 2004, 53(1):95-98.

[23] RAMESH A, MELKOTE S N. Modeling of white layer formation under thermally dominant conditions in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008(48):402-414.

[24] UMBRELLO D. Influence of material microstructure changes on surface integrity in hard machining of AISI 52100 steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54(9):887-898.

[25] UMBRELLO D, OUTEIRO J C, M'SAOUBI R, et al. A numerical model incorporating the microstructure alteration for predicting residual stresses in hard machining of AISI 52100 steel[J]. CIRP Annals, 2010, 59(1):113-116.

[26] SIMONEAU A, NG E, ELBESTAWI M A. Grain size and orientation effects when microcutting AISI 1045 steel[J]. CIRP Annals, 2007, 56(1):57-60.

[27] SIMONEAU A, NG E, ELBESTAWI M A. Surface defects during microcutting[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006(46):1378-1387.

[28] CARUSO S, DI RENZO S, DILLON O W, et al. Finite element modeling of microstructural changes in hard turning of AISI 52100 steel[J]. Advances in Materials Research, 2011(223):960-969.

(责编 冬月)